第 37 卷第 19 期 生 态 学 报 Vol.37,No.19
2017 年 10 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201607091409

贾艳青, 张勃,张耀宗,唐敏,马彬,王国强.长江三角洲地区极端气温事件变化特征及其与 ENSO 的关系.生态学报,2017,37(19):6402-6414.

Jia Y Q, Zhang B, Zhang Y Z, Tang M, Ma B, Wang G Q.Correlation analysis of variation of extreme temperature events and El Niño Southern Oscillation (ENSO) in Yangtze River Delta region during 1960—2014.Acta Ecologica Sinica,2017,37(19):6402-6414.

长江三角洲地区极端气温事件变化特征及其与 ENSO 的关系

贾艳青[1,2], 张 勃[1,*],张耀宗[1],唐 敏[1],马 彬[1],王国强[1]

1 西北师范大学地理与环境科学学院,兰州 730070

2 忻州师范学院地理系,忻州 034000

摘要:基于 1960—2014 年 65 个气象站点逐日最高、最低气温和平均气温资料,分析了长江三角洲地区极端气温事件的变化规律和 ENSO 事件强度对极端气温指数变化趋势的影响。结果表明:近 55 年长江三角洲地区夏季日数(SU)、热夜日数(TR)、暖昼日数(TX90)、暖夜日数(TN90)、异常暖昼持续指数(WSDI)、生长期(GSL)均呈增加趋势,其中暖夜日数(TN90)增加幅度最大,增幅为 8.55d/10a;极值指数也呈上升趋势,其中月最低气温极小值(TNn)上升幅度最大为(0.53℃/10a);冰冻日数(ID)、霜冻日数(FD)、冷昼日数(TX10)、冷夜日数(TN10)、异常冷昼持续指数(CSDI)均呈减少趋势,其中冷夜日数(TN10)减少幅度最大(-6.06d/10a);月平均日较差(DTR)以 0.11℃/10a 的速率呈下降趋势。空间上,所有站点 SU、TXn、TNx 呈增加趋势;TR、TX90、TN90、TNn、TXx、WSDI、GSL 分别有 97%、85%、98%、95%、78%、92%、94%的站点呈增加趋势;所有站点 ID、FD、TX10、TN10 呈减少趋势;CSDI、DTR 分别有 87%、77%的站点呈减少趋势。多数极端气温指数与纬度、经度、海拔显著相关。气候变暖突变后,极端暖指数明显增加,极端冷指数明显减少。总体上,厄尔尼诺对极端气温指数的影响大于拉尼娜的影响。

关键词:极端气温指数;空间分布;气候变化;ENSO

Correlation analysis of variation of extreme temperature events and El Niño Southern Oscillation(ENSO) in Yangtze River Delta region during 1960—2014

JIA Yanqing[1,2], ZHANG Bo[1,*], ZHANG Yaozong[1], TANG Min[1], MA Bin[1], WANG Guoqiang[1]

1 *College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *China*

2 *Department of Geography, Xinzhou Normal University, Xinzhou* 034000, *China*

Abstract: Based on daily temperature (maximum, minimum, and average) data of 65 stations, spatial and temporal changes of extreme temperature events and the El Niño Southern Oscillation (ENSO) influence on the extreme temperature threshold over Yangtze River Delta were analyzed for the period 1960—2014. The results showed that in the last 55 years, the extreme temperature indices, i.e. summer days (SU), tropical nights (TR), warm days (TX90), warm nights (TN90), warm spell duration days (WSDI), and growing season length (GSL) have all increased significantly, and TN90 showed an increasing rate of 8.55d per decade. The extremal indices (TXn, TNn, TXx, and TNx) had increasing trends in the Yangtze River Delta region, and TNn showed an increasing rate of 0.53℃ per decade. The ice days (ID), frost days (FD), cold days (TX10), cold nights (TN10), and cold spell duration days (CSDI) have decreased significantly by 0.40 d, 4.03 d, 2.56 d, 6.06 d and 0.33 d per decade, respectively, and TN10 showed a decreasing rate of 6.06 d per decade.

基金项目:国家自然科学基金项目(41561024);高校博士学科点专项科研基金项目(20136203110002);山西省高等学校哲学社会科学研究项目(2015265)

收稿日期:2016-07-09; **网络出版日期**:2017-05-27

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangbo@ nwnu.edu.cn

DTR has decreased by 0.11℃ per decade. For the spatial distribution of SU, TXn and TNx, all meteorological stations showed increasing trends during 1960—2014. TR, TX90, TN90, TNn, TXx, WSDI, and GSL showed increasing trends at 97%, 85%, 98%, 95%, 78%, 92%, and 94% of meteorological stations, respectively. ID, FD, TX10, and TN10 showed decreasing trends for all stations. For CSDI and DTR, 87% and 77% stations showed decreasing trend. Most extreme temperature indices show good correlation with latitude, longitude, and altitude. After the detected abrupt climate changes, extreme warm indices increased, and extreme cold indices decreased significantly. Overall, the effect of El Niño on extreme temperature indices was greater than the effect of La Nina.

Key Words: extreme temperature indices; spatial distribution; climate change; ENSO

近 100 年,全球地表温度升高了 0.85℃[1],近 50 年中国年平均地面温度以 0.22℃/10a 的速率上升了 1.1℃,增幅比同期全球或北半球高很多[2]。全球气温升高不仅导致极端气温发生变化,而且引起极端气候事件频率和强度的变化。近年来,中国群发性或区域性的极端气候事件频次和范围不断增大[3]。长江三角洲地区地处中国东部,由于地势低洼,是中国自然灾害高风险地区,尤其台风、洪涝、热浪等极端气候灾害频繁,对当地经济发展和人民生活造成不利影响。近年来不同学者从极端高温、低温事件发生频率、强度[4],极端高、低温灾害特征[5],极端气温事件发生原因[6]等不同角度对长江三角洲地区极端气温事件开展了研究,但这些研究仅关注气温极值态下的某一类极端气温事件,综合应用多指标对长江三角洲地区极端气温事件的研究较少且研究时间序列截止年份也较早。本研究采用更长时间序列资料和最新的极端气温指数研究极端气温变化特征,以期进一步认识长江三角洲地区极端天气气候事件变化规律,为构建自然灾害防御应急机制和气候安全体系提供基础资料。

研究表明,厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)是海洋与大气环流耦合过程中的强烈信号,常引起大气环流的改变并对全球范围的气候异常都有明显的影响[7-9],同时许多观测也证实了赤道中东太平洋海表温度异常与长江中下游地区气温升高有很好的对应关系。近年来,在 ENSO 对我国冬季气温变化的影响方面取得了大量的研究成果[10-14],但长江三角洲地区极端气温与 ENSO 之间关系的研究未见报道。因此,本文分析 ENSO 对长江三角洲地区极端气温变化趋势的影响,为深入认识长江三角洲地区极端天气事件的变化特征和成因提供科学依据。

1　数据与方法

1.1　数据来源

气象数据来源于中国气象局国家气象信息中心,本文所指的长江三角洲地区在行政区划上包括安徽省、江苏省、浙江省和上海市。选取了该区 70 个气象站 1960—2014 年逐日平均气温、最高气温、最低气温资料,依据每月累计缺测不超过 10%,每年累计缺测不超过 5%的标准剔除了不符合要求的数据,共选取了 65 个气象站(图 1)。记录显示,自 1960 年以来,砀山、阜宁、南通、义乌、铜陵、射阳、如皋、金华 8 站均发生过迁站。由于台站迁移和观测方式发生改变等因素,使得这些站点的气候序列不可避免地存在不均一性现象,因此研究中使用 RHtest 方法对上述 8 个台站的数据进行了均一化检验。ENSO 数据来源于美国海洋大气局(NOAA)气候预测中心(CPC),时间段为 1960—2014 年,选用赤道

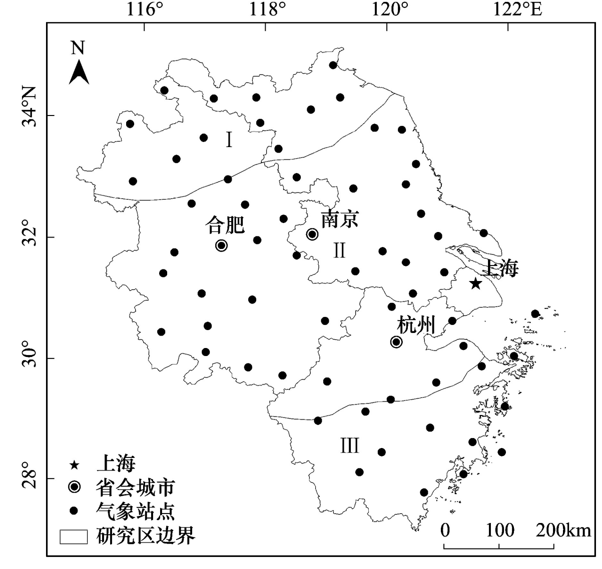


图 1　长江三角洲地区气象站点分布图

Fig. 1　Distribution of meteorological stations in the Yangtze River Delta

中、东太平洋 El Niño 3.4 区(5°N—5°S,120°—160°W)的海洋表面温度距平 SSTA 数据来表征 ENSO 事件。本文根据研究区气候特点将长江三角洲地区划分为 3 个子区域,Ⅰ区为南温带亚湿润区,包括安徽和江苏北部,共分布 12 个气象站点;Ⅱ区为北亚热带湿润区,包括上海、安徽和江苏中南部及浙江北中部,共分布 40 个气象站点;Ⅲ区为中亚热带湿润区,包括浙江中南部,共分布 13 个气象站点。

1.2 研究方法

极端气温指数采用的是 WMO 气候委员会与 CLIVAR 计划联合设立的气候变化检测、监测和指标专家组(ETCCDMI)确定的极端气温变化指标(表 1),使用 Rclimdex 软件计算了长江三角洲地区 65 个气象站点的 16 个极端气温指数。采用一元线性趋势法分析极端气温指数的时间变化趋势[15],并使用 Mann-Kendall(M-K)方法进行变化趋势的显著性检验[16],空间插值采用反距离加权插值法,突变检验采用 Mann-Kendall (M-K)法。运用 Morlet 连续小波分析方法[17],分析研究区近 55a 极端气温指数的周期变化特征。选用 El Niño 3.4 区海表温度距平 SSAT 来表征 ENSO 事件,当 SSAT 连续 6 个月高于 0.5℃时为 1 次 El Niño 事件或 ENSO 暖事件,当连续 6 个月低于-0.5℃时为 1 次 La Nina 事件或 ENSO 冷事件。根据李晓燕等[18]对 ENSO 暖(冷)事件划分标准的研究,对 ENSO 事件强度等级进行量化,将 El Niño 事件年强弱程度按照极强(5)、强(4)、中等(3)、弱(2)、极弱(1),La Nina 事件年强弱程度按照极强(-5)、强(-4)、中等(-3)、弱(-2)、极弱(-1)的标准分别划分为 5 类强度年,未受 ENSO 事件影响的年份定义为 0。

表 1 极端气温指标的定义

Table 1 Definition of extreme temperature indices

分类 Classification	缩写 Abbreviations	极端气温指标 Extreme temperature indices	定义 Definitions	单位 Units
绝对指数 Absolute indices	ID	冰冻日数	一年中日最高气温小于 0℃的天数	d
	FD	霜冻日数	一年中日最低气温小于 0℃的天数	d
	SU	夏季日数	一年中日最高气温大于 25℃的天数	d
	TR	热夜日数	一年中日最低气温大于 20℃的天数	d
相对指数 Relative indices	TX10	冷昼日数	日最高气温小于 10%分位值的日数	d
	TN10	冷夜日数	日最低气温小于 10%分位值的日数	d
	TX90	暖昼日数	日最高气温大于 90%分位值的日数	d
	TN90	暖夜日数	日最低气温大于 90%分位值的日数	d
极值指数 Extreme value indices	TXn	月最高气温极小值	每月中日最高气温的最小值	℃
	TNn	月最低气温极小值	每月中日最低气温的最小值	℃
	TXx	月最高气温极大值	每月中日最高气温的最大值	℃
	TNx	月最低气温极大值	每月中日最低气温的最大值	℃
其它指数 Other indices	WSDI	异常暖昼持续指数	每年至少连续 6 天日最高气温大于 90%分位值的日数	d
	CSDI	异常冷昼持续指数	每年至少连续 6 天日最高气温小于 10%分位值的日数	d
	GSL	生长期	年内首先出现日平均气温至少连续 6 日高于 5℃的总日数及 7 月 1 日后平均气温至少连续 6 日低于 5℃的总日数	d
	DTR	月平均日较差	日最高气温与日最低气温之差的月平均值	℃

2 结果分析

2.1 长江三角洲地区极端气温指数时空变化

2.1.1 年际变化趋势

长江三角洲地区 16 种极端气温指数的年际变化趋势表明(表 2),绝对指数 ID 与 FD 以-0.40d/10a 和-4.03d/10a的速率显著下降,SU 和 TR 以 3.29d/10a 和 3.14d/10a 的速率显著上升。相对指数 TX10 和 TN10 呈显著减少趋势,年际倾向率分别为-2.56d/10a 和-6.06d/10a;TX90 和 TN90 呈显著增加趋势,年际倾向率

分别为 4.27d/10a 和 8.55d/10a。TXn、TNn、TXx 和 TXn 均表现为上升趋势,其年际倾向率分别为 0.35、0.53、0.17、0.27℃/10a。其它指数中 CSDI 和 DTR 呈减少趋势,年际倾向率分别为-0.33 d/10a 和-0.11℃/10a;WSDI 和 GSL 呈增加趋势,年际倾向率分别为 1.34d/10a 和 3.11d/10a。以上极端气温指数的变化趋势中,除 TXx 和 CSDI 仅通过 0.05 的显著性检验外,其它指数均通过 0.01 或 0.001 的显著性水平检验。

3 个气候区的极端气温指数与全区变化趋势一致,冷指日数呈上升趋势,暖指日数呈下降趋势,极值指数微弱上升。绝对指数 ID 和 FD 在Ⅰ区减少趋势最明显,年际倾向率分别为-0.84d/10a 和-6.20 d/10a;SU 在Ⅲ区增加趋势最明显(4.30 d/10a),TR 在Ⅰ区增加趋势最明显(3.90 d/10a)。相对指数 TX10 在Ⅲ区减少趋势最大(-3.52d/10a),在Ⅰ区减少趋势最小。

表 2　长江三角洲地区极端气温指数年际变化趋势、显著性检验及与其它区域对比

Table 2　Comparison between the inter-annual variation trends, significance test of temperature extremes over Yangtze River Delta and other different climatic regions

指数 Indices	长江三角洲地区 Yangtze River Delta(1960—2014)								中国 China (1961—2008)	长江流域 Yangtze River Basin (1962—2011)
	全区 Whole region		Ⅰ区 Ⅰ region		Ⅱ区 Ⅱ region		Ⅲ区 Ⅲ region			
	K	*P*	*K*	*P*	*K*	*P*	*K*	*P*	*K*	*K*
ID	-0.40	0.010	-0.84	0.016	-0.36	0.013	-0.09	0.033	-2.32	-0.48
FD	-4.03	<0.0001	-6.20	<0.0001	-3.85	<0.0001	-2.58	<0.0001	-3.48	-3.29
SU	3.29	<0.0001	1.55	0.051*	3.48	<0.0001	4.30	<0.0001	1.18	2.93
TR	3.14	<0.0001	3.90	<0.0001	3.02	<0.0001	2.82	<0.0001	2.00	1.80
TX10	-2.56	0.003	-1.87	0.055*	-2.45	0.008	-3.52	<0.0001	-0.47	-0.84
TN10	-6.06	<0.0001	-7.31	<0.0001	-5.86	<0.0001	-5.50	<0.0001	-2.06	-2.78
TX90	4.27	<0.001	-0.22	0.832*	4.91	0.0001	6.43	<0.0001	0.62	2.24
TN90	8.55	<0.0001	11.15	<0.0001	7.81	<0.0001	8.41	<0.0001	1.75	2.86
TXn	0.35	0.005	0.34	0.019	0.59	<0.0001	0.36	0.003	0.35	0.33
TNn	0.53	<0.0001	0.75	0.0002	0.52	0.0001	0.36	0.0003	0.63	0.47
TXx	0.17	0.032	0.00	0.968*	0.20	0.024	0.26	0.003	0.07	0.16
TNx	0.27	<0.0001	0.28	<0.0001	0.26	<0.0001	0.27	<0.0001	0.21	0.19
WSDI	1.34	0.004	0.40	0.333*	1.52	0.004	1.66	0.0003	/	0.83
CSDI	-0.33	0.015	-0.30	0.072*	-0.30	0.038	-0.47	0.009	/	-0.67
GSL	3.11	0.005	4.85	0.0002	2.88	0.030	2.21	0.017	/	0.23
DTR	-0.11	0.0006	-0.33	<0.0001	-0.08	0.016	0.00	0.914*	-0.18	-0.07

K 表示年际倾向率,*P* 表示显著性水平,* 未通过 0.05 显著性检验

TN10 在Ⅰ区减少趋势最大(-7.31d/10a);TX90 在Ⅱ区和Ⅲ区均为增加趋势,其中Ⅲ区增加趋势最明显(6.43 d/10a);TN90 在Ⅰ区增加趋势最大(11.15 d/10a)。极值指数除 TXx 在Ⅰ区没有明显变化外,其它指数在 3 个分区均为微弱增加趋势。TXn 在Ⅱ区上升趋势最显著(0.59℃/10a),在Ⅲ区次之;TNn 在Ⅰ区上升趋势最大(0.75℃/10a);TXx 在Ⅲ区上升趋势最大(0.26℃/10a);TNx 在 3 个分区上升趋势差异不大。其它指数中除 DTR 在Ⅲ区变化趋势不明显且未通过显著性检验外,在各气候区中,CSDI 和 DTR 呈减少趋势,WSDI 和 GSL 呈增加趋势。CSDI 在Ⅲ区减少趋势最显著(-0.47 d/10a);DTR 在Ⅰ区减少趋势最显著(-0.33℃/10a);WSDI 和 GSL 分别在Ⅲ区和Ⅰ区增加趋势显著,年际倾向率分别为 1.66 和 4.85 d/10a。

对比分析长江三角洲地区与全国、长江流域大致相同时段极端气温指数的变化趋势值发现(表 2),长江三角洲地区暖指日数(SU、TR、TX90、TN90、WSDI、GSL)增加趋势、冷指日数(ID、FD、TX10、TN10、CSDI)减少趋势和多数极值指数的上升趋势均比全国和长江流域明显,表明长江三角洲地区气温上升趋势要比全国和长江流域显著,这与崔林丽、谢志清[4,19]等的研究结论一致,原因可能是长江三角洲地区人为热排放量随着城市化的快速发展不断增加造成的。

2.1.2　空间变化

图 2 是长江三角洲地区极端气温指数变化趋势的空间分布。可以看出,除瑞安站不存在冰冻日数外,所有站点ID均处于减少趋势,但变幅较小,多数站点的倾向率在-1.2—0.1d/10a之间,其中Ⅰ区减少趋势比较

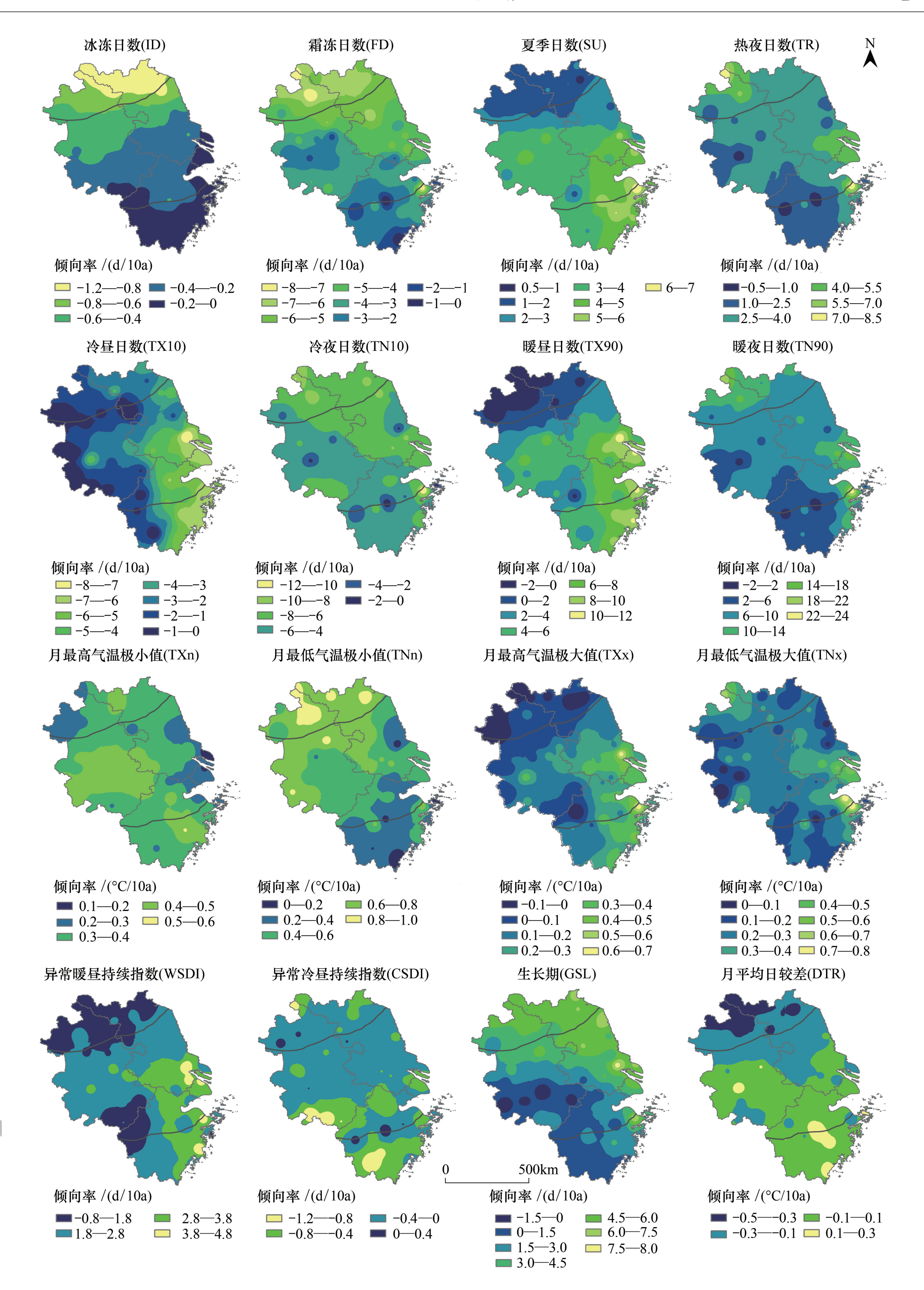


图 2 长江三角洲地区各项极端气温指数变化趋势空间分布

Fig.2 Spatial distribution of inter-annual variation of temperature extremes in the Yangtze River Delta

明显,平均为-0.82d/10a,赣榆减少速率达-1.2d/10a。所有站点 FD 均呈减少趋势, Ⅰ 区减少幅度较大,平均为-5.94 d/10a。所有站点 SU 均为增加趋势,Ⅱ区和Ⅲ区站点增加趋势显著,尤其义乌、仙居、鄞县站,平均增加幅度为 6.22 d/10a。97%的站点 TR 为增加趋势,长江三角洲北部和中部多数站点增加趋势较明显,平均为 5.65 d/10a。

所有站点 TX10 均呈减少趋势,长江三角洲东部部分站点减少趋势比较明显,平均为-3.94 d/10a。所有站点 TN10 均处于减少趋势,减幅为-11.8—-0.66 d/10a, Ⅰ 区和 Ⅱ 区中东部减少趋势明显,平均为 7.62 d/10a。TX90 有 85%的站点呈增加趋势,增加幅度为 0.3—11.95 d/10a;Ⅱ区和Ⅲ区多数站点增加趋势较明显,平均为 6.79 d/10a,其余 15%的站点处于减少趋势。TN90 除义乌站(1.88 d/10a)趋于减少外,其余站点以 0.20—23.62 d/10a 的速率呈增加趋势;Ⅰ区和Ⅱ区大部分站点增加趋势显著,平均为 10.15 d/10a。

所有站点 TXn 均呈上升趋势,平均为 0.38℃/10a。Ⅰ区西部和Ⅱ区东部上升趋势微弱,平均为 0.22℃/10a。TNn 除瑞安、定海和如皋 3 个站点外,均表现为上升趋势,平均为 0.59℃/10a;TXx 有 78%的站点呈上升趋势,主要集中在Ⅱ区和Ⅲ区东部,其余地区上升趋势比较微弱,Ⅰ区西北部部分站点还表现为下降趋势。全区 TNx 呈上升趋势,其中Ⅱ区东南部部分地区上升速率较大,上升速率较小的地区零散分布在各区。总体来看,TNx 变化趋势的空间差异表现不明显。

92%的站点 WSDI 处于增加趋势,主要分布在Ⅲ区和Ⅱ区除西南部之外的大部分地区,平均增加趋势 2.61 d/10a。87%的站点 CSDI 呈减少趋势。GSL 总体分布为增加趋势,大约占到总站点数的 94%,增加趋势较明显的区域是Ⅰ区和Ⅱ区东北部,平均增幅为 4.90 d/10a。DTR 的空间分布下降趋势的站点数多于上升的站点数,占总站点数的 77%,Ⅰ区北部下降趋势比较明显,砀山站下降趋势达-0.56℃/10a。

2.2 极端气温指数的突变分析

M-K 突变检验结果表明(表 3),近 55a 长江三角洲地区 16 个极端气温指数均有突变发生。极端冷指数

表 3　长江三角洲地区极端气温指数突变分析

Table 3　Summary on the mutation analysis of extreme temperature indices in the Yangtze River Delta

指数 Indices	序列长度 Sequence length	突变点 Catastrophe point	突变前后变化趋势 Change trend pre and post mutations	显著性 Significance
冰冻日数(ID)	1960—2014 年	1985 年	增加→减少	显著
霜冻日数(FD)	1960—2014 年	1986 年	增加→减少	显著
夏季日数(SU)	1960—2014 年	2000 年	增加→微弱减少	显著
热夜日数(TR)	1960—2014 年	2000 年	减少→增加	显著
冷昼日数(TX10)	1960—2014 年	1994 年	增加→减少	显著
冷夜日数(TN10)	1960—2014 年	1991 年	增加→减少	显著
暖昼日数(TX90)	1960—2014 年	1999 年	减少→增加	显著
暖夜日数(TN90)	1960—2014 年	1998 年	减少→增加	显著
月最高气温极小值(TXn)	1960—2014 年	1986 年	下降→上升	显著
月最低气温极小值(TNn)	1960—2014 年	1986 年	下降→上升	显著
月最高气温极大值(TXx)	1960—2014 年	2001 年	上升→下降	显著
月最低气温极大值(TNx)	1960—2014 年	2000 年	下降→上升	显著
异常暖昼持续指数(WSDI)	1960—2014 年	1998 年	减少→增加	显著
异常冷昼持续指数(CSDI)	1960—2014 年	1994 年	增加→减少	显著
生长期(GSL)	1960—2014 年	1992 年	减少→增加	显著
月平均日较差(DTR)	1960—2014 年	1974 年	上升→下降	显著

(ID、FD、TX10、TN10、CSDI)在突变时间点前后均呈现由增加到减少的转变;极端暖指数除 SU 在突变点后微弱减少外, TR、TX90、TN90、WSDI、GSL 在突变点前后均表现出由减少到增加的转变;极值指数中,除 TXx 在突变点后呈下降趋势外,其它极值指数在突变点前后都经历了由低到高的转变;DTR 在突变点前后呈由上升到下降的转变。多数极端气温指数在突变点前后的变化特征表明长江三角洲地区对全球变暖有较好的响应。对比长江三角洲地区与长江流域、珠江流域及全国极端气温的突变情况[21-22],发现多数突变均发生在 20 世纪 80 年代至 2000 年初,并且只发生过一次突变。

2.3 极端气温指数周期变化分析

图 3 为长江三角洲地区 ID 和 FD 小波方差图。ID 在 1968—1978 年以 4a 尺度为中心存在明显的高低震荡。1960—1983 年在 5—10a 的时间尺度上存在明显的高低震荡,1960—1990 年以 17a 为中心存在明显高低震荡。由小波方差图可知,ID 存在 4a、6a、11a、17a 的震荡周期,其中 17a 为主周期。FD 在 1960—2014 年有 4—6a 的高低震荡变化,1960—1990 年以 21a 为中心存在两次明显的高低震荡变化。从小波方差图得知,FD 存在 2a、5a、11a、21a 的震荡周期,其中 21a 为主周期。其它极端气温指数小波分析特征见表 4。

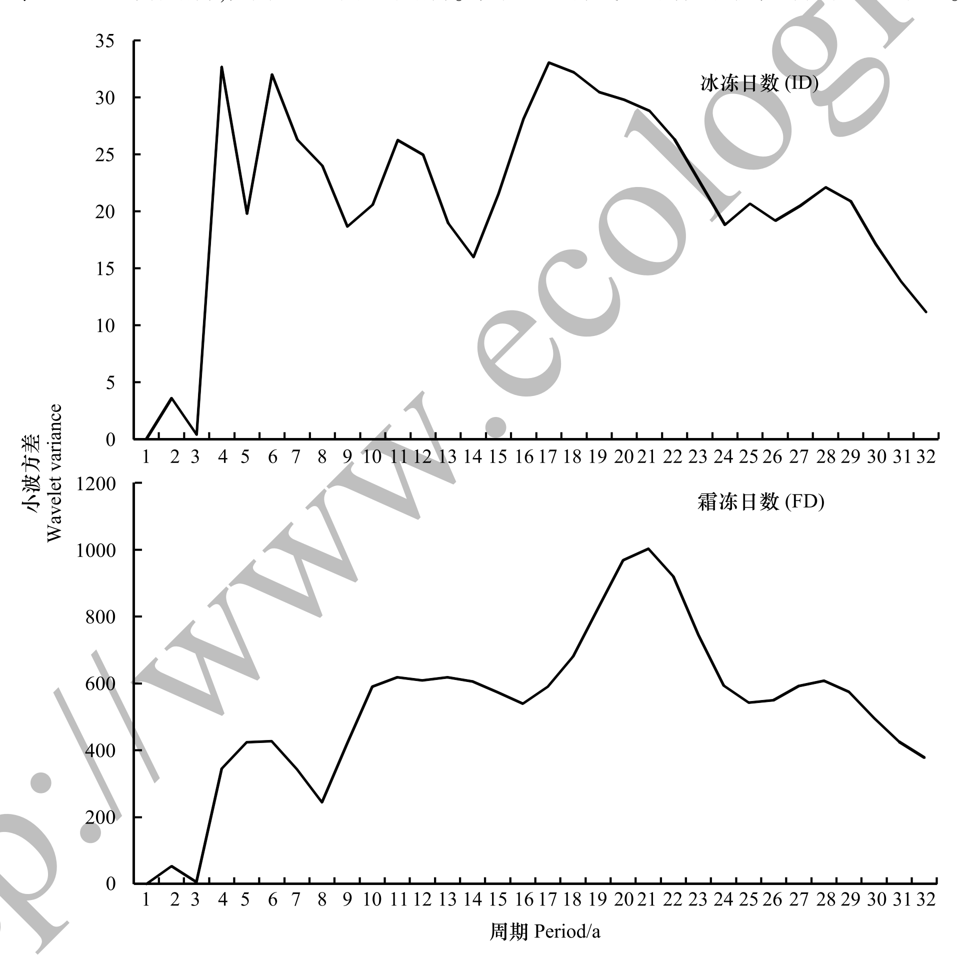


图 3 长江三角洲地区 ID 和 FD 小波方差图

Fig.3 The wavelet variances of ID and FD in the Yangtze River Delta

2.4 极端气温指数与海拔、经纬度的关系

表 5 是 16 项极端气温指数与地理位置的相关系数。多数极端气温指数与纬度、经度和海拔显著相关。ID、FD 、SU、TX90、DTR、TN10、TXx、WSDI 与纬度显著负相关,与经度显著正相关。ID 与纬度的相关系数为 −0.86,TX90 与经度的相关系数为 0.61。TX10、TNn 与纬度显著正相关,与经度显著正相关。TR、TN90、TNx、GSL 与纬度显著正相关,TNx 与经度显著正相关。TR、TN90、TXx、TNx、WSDI、GSL 与海拔负相关,ID、FD、

TN10 与海拔正相关。

表 4　长江三角洲地区极端气温指数周期分析

Table 4　Summary on the period analysis of extreme temperature indices in the Yangtze River Delta

指数 Indices	序列长度 Sequence length	周期 Period	主周期 Main period
冰冻日数(ID)	1960—2014 年	4a/6a/11a/17a	17a
霜冻日数(FD)	1960—2014 年	5a/11a/21a	21a
夏季日数(SU)	1960—2014 年	6a/14a/21a	14a
热夜日数(TR)	1960—2014 年	4a/6a/12a	12a
冷昼日数(TX10)	1960—2014 年	16a/24a	24a
冷夜日数(TN10)	1960—2014 年	9a/21a/28a	28a
暖昼日数(TX90)	1960—2014 年	6a/14a/21a	14a
暖夜日数(TN90)	1960—2014 年	6a/12a	6a
月最高气温极小值(TXn)	1960—2014 年	5a/10a/17a	17a
月最低气温极小值(TNn)	1960—2014 年	5a/10a/17a/28a	10a
月最高气温极大值(TXx)	1960—2014 年	5a/9a/16a	16a
月最低气温极大值(TNx)	1960—2014 年	5a/12a/17a/28a	17a
异常暖昼持续指数(WSDI)	1960—2014 年	6a/15a/28a	15a
异常冷昼持续指数(CSDI)	1960—2014 年	6a/9a/14a/21a/27a	21a
生长期(GSL)	1960—2014 年	5a/10a/15a	10a
月平均日较差(DTR)	1960—2014 年	4a/7a/14a/21a/28a	21a

表 5　长江三角洲地区极端气温指数与地理位置的相关系数

Table 5　Comparison of correlation coefficient between the linear trends in extreme temperature indices and geographical parameters in the Yangtze River Delta

	ID	FD	SU	TR	TX10	TN10	TX90	TN90
纬度 Latitude	−0.86***	−0.72***	−0.66***	0.29*	0.33**	−0.33**	−0.59***	0.29*
经度 Longitude	0.55***	0.28*	0.50***	0.06	−0.71***	0.05	0.61***	0.12
海拔 Altitude	0.30*	0.38**	0.01	−0.30*	0.15	0.25*	−0.15	−0.34**
	TXn	TNn	TXx	TNx	WSDI	CSDI	GSL	DTR
纬度 Latitude	−0.18	0.54***	−0.40**	0.04**	−0.27*	0.19	0.65***	−0.67***
经度 Longitude	−0.19	−0.53***	0.56***	0.13**	0.42***	−0.09	0.09	0.40***
海拔 Altitude	0.15	−0.17	−0.32**	−0.28**	−0.41***	−0.19	−0.43***	0.22

＊＊＊、＊＊、＊表示通过 0.001、0.01 和 0.05 水平的显著性检验

从不同纬度带极端气温指数的变化趋势来看(表 6),大多数极端气温指数在高纬度带变幅大,在低纬度带变幅小。ID、FD、TN10、TX90 随纬度的增加而减少,即纬度每增加 1°,ID、FD、TN10、TX90 的变化幅度分别减少 0.15d/10a、0.68d/10a、0.47 d/10a、−0.99 d/10a。SU 和 TR 的增加幅度在 29°N 分别是最大值和最小值。TX10、TN90 的变幅在 29°N 最大,在 29°N—35°N 之间随着纬度的增加而增加。TNx 和 GSL 的变幅随着纬度的增加而增加,TNx 在 28°N—32°N 变幅呈增加趋势,GSL 在 31°N—35°N 变幅呈增加趋势。WSDI 和 DTR 的变幅随着纬度的增加而减少,其变幅分别在 31°N—35°N、30°N—35°N 随纬度增加呈减少趋势,TXn 变幅在 28°N—32°N 之间变化平稳,30°N 以南变幅增加。TXx 和 CSDI 随纬度的变化并未表现出明显的增减趋势。

2.5　长江三角洲地区极端气温指数与区域气候变化的相关分析

为了解长江三角洲地区极端气温指数变化与区域气温增暖的关系,计算了 1960—2014 年年平均气温与各极端气温指数的相关系数(表 7),可以看出 12 项极端气温指数与平均气温的相关性较好,其中 ID、FD、SU、GSL、DTR 与平均气温的相关系数在 0.6 以上,表明长江三角洲地区极端气温指数变化对全球气候变暖有较好的响应。

表 6 长江三角洲地区不同纬度带极端气温指数的平均变化趋势

Table 6 Mean trends per decade of extreme temperature in categorized latitude ranks over Yangtze River Delta

纬度/°N Latitude/°N	站点数 Number of stations	ID/ (d/10a)	FD/ (d/10a)	SU/ (d/10a)	TR/ (d/10a)	TX10/ (d/10a)	TN10/ (d/10a)	TX90/ (d/10a)	TN90/ (d/10a)
28	5	-1.16	-6.40	3.91	2.64	-3.67	-7.84	7.03	11.79
29	6	-0.87	-5.88	4.69	1.62	-1.50	-7.71	6.16	4.93
30	10	-0.52	-5.28	3.97	2.73	-2.17	-6.31	5.90	8.06
31	12	-0.37	-4.02	3.94	3.17	-2.47	-6.25	5.69	8.10
32	11	-0.27	-3.56	3.69	3.23	-2.72	-6.07	5.22	8.11
33	10	-0.20	-3.05	1.86	3.46	-2.80	-5.82	2.07	8.52
34	10	-0.17	-2.36	1.78	4.22	-2.86	-5.14	1.35	8.53
35	1	-0.07	-1.76	2.09	3.52	-3.12	-4.28	0.35	10.63
倾向率 Tendency rate		0.15	0.68	-0.6	0.35	-0.26	0.47	-0.99	1.03
纬度/°N Latitude/°N	**站点数 Number of stations**	**TXn/ (℃/10a)**	**TNn/ (℃/10a)**	**TXx/ (℃/10a)**	**TNx/ (℃/10a)**	**WSDI/ (℃/10a)**	**CSDI/ (℃/10a)**	**GSL/ (℃/10a)**	**DTR/ (℃/10a)**
28	5	0.39	0.31	0.21	0.21	1.42	-0.70	1.06	-0.01
29	6	0.39	0.35	0.27	0.22	1.94	-0.15	1.93	0.09
30	10	0.35	0.48	0.20	0.33	1.27	-0.53	2.18	-0.33
31	12	0.35	0.48	0.22	0.26	1.76	-0.27	1.44	-0.26
32	11	0.37	0.53	0.25	0.30	2.06	-0.25	3.82	-0.22
33	10	0.30	0.63	0.05	0.20	0.63	-0.20	4.32	-0.07
34	10	0.35	0.69	0.03	0.30	0.52	-0.32	5.48	-0.04
35	1	0.38	0.73	0.11	0.19	0.46	-0.57	6.18	-0.07
倾向率 Tendency rate		-0.005	0.07	0.03	0.02	-0.50	0.01	1.11	0.08

表 7 长江三角洲地区极端气温指数变化趋势与平均气温的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between annual mean air temperature and extreme temperature indices in the Yangtze River Delta

指数 Indices	ID	FD	SU	TR	TX10	TN10	TX90	TN90
相关系数 Correlation coefficient *r*	0.81***	0.70***	0.65***	-0.27*	-0.24	0.34**	0.56***	-0.30*
指数 Indices	**TXn**	**TNn**	**TXx**	**TNx**	**WSDI**	**CSDI**	**GSL**	**DTR**
相关系数 Correlation coefficient *r*	0.17	-0.51***	0.40***	0.03	0.31*	-0.12	-0.65***	0.64***

* * *、* *、* 分别表示通过 0.001、0.01 和 0.05 的显著性检验

为进一步探讨区域气候变暖对极端气温指数的影响，通过 M-K 方法对长江三角洲地区年平均气温做突变检验发现 1996 年是明显突变点，依此为节点分别统计突变点后平均气温和各极端气温指数的变化趋势（表 8）。可看出，在 1996 年突变后，平均气温、各项暖指数 SU、TR、TX90、TN90、WSDI、GSL 和极值指数均表现为上升趋势，冷指数 ID、FD、TX10、TN10、CSDI 和 DTR 均呈下降趋势。可见全球变暖背景下，长江三角洲地区变暖趋势明显。

表 8 长江三角洲地区平均气温突变后平均气温和极端气温指数变化

Table 8 The changes of mean temperature and extreme temperature indices during 1960—1996 and 1996—2014 in the Yangtze River Delta

指数 Indices	1960—1995	1996—2014	变化对事件的影响 Effect of change on event	突变点后变化趋势 Change trend pre and post mutations
平均气温 Mean temperature	15.57	16.47	0.9	上升
ID	2.06	1.05	-1.01	减少
FD	47.84	35.71	-12.13	减少
SU	134.91	148.22	13.31	增加
TR	93.56	105.31	11.75	增加

续表

指数 Indices	1960—1995	1996—2014	变化对事件的影响 Effect of change on event	突变点后变化趋势 Change trend pre and post mutations
TX10	36.88	27.46	-9.42	减少
TN10	36.64	17.37	-19.27	减少
TX90	38.18	56.57	18.39	增加
TN90	39.03	71.14	32.11	增加
TXn	-0.48	0.49	0.97	上升
TNn	-7.85	-6.37	1.48	上升
TXx	36.9	37.51	0.61	上升
TNx	27.56	28.42	0.86	上升
WSDI	4.09	9.57	5.48	增加
CSDI	1.82	0.71	-1.11	减少
GSL	317.4	328.3	10.9	增加
DTR	8.45	8.19	-0.26	下降

2.6　极端气温指数与 ENSO 的相关分析

统计 1960—2014 年的 ENSO 事件,共发生 35 次 ENSO 事件,其中 13 个年份发生暖事件,22 个年份发生冷事件。ENSO 事件的发生具有周期性特点(图 4),El Niño 事件有 3 个高峰期,分别为 1982—1983 年、1991—1992 年、1997—1998 年。La Nina 事件有 3 个高峰期,分别是 1973—1976 年、1988—1989 年、1999—2000 年。

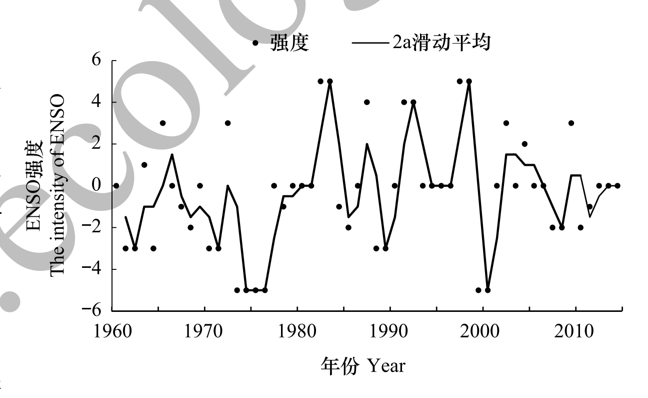


图 4　1960—2014 年厄尔尼诺/拉尼娜事件的发生强度

Fig.4　The occurrence intensity of El Niño /La Nina events from 1960 to 2014

图 5 为长江三角洲地区 ENSO 事件与极端气温指数 ID 和 WSDI 距平关系图。由图可知,多数厄尔尼诺年 ID 在减少,负距平几率是 85%,69%的厄尔尼诺年下一年 ID 距平小于 0,54%的厄尔尼诺年下一年 ID 距平大于厄尔尼诺年。68%的拉尼娜年 ID 距平小于 0,32%的拉尼娜年下一年 ID 距平大于 0,50%的拉尼娜年下一年 ID 距平大于拉尼娜年。半数厄尔尼诺年 WSDI 在增加,正距平的几率是 54%,54%的厄尔尼诺年下一年 WSDI 距平大于 0,46%的厄尔尼诺年下一年 WSDI 距平大于厄尔尼诺年。55%的拉尼娜年 WSDI 距平大于 0,59%的拉尼娜年下一年 WSDI 距平小于 0,59%的拉尼娜年下一年 WSDI 距平小于拉尼娜年。

表 9 是厄尔尼诺年、拉尼娜年及各自滞后一年 16 个极端气温指数的统计值。分析可知,暖指日数 SU、TR、TN90、WSDI、DSL 和极值指数 TXn、TXx、TNx 在厄尔尼诺年或厄尔尼诺滞后一年大于正常年。在厄尔尼诺年或厄尔尼诺滞后一年,多数暖指日数和极值指数的值在 5 类年份中最大,表明厄尔尼诺现象加剧了长江三角洲地区暖指日数增加和极值指数上升。在拉尼娜滞后一年,冷指数 ID、FD、TX10、TN10 多年平均值大于厄尔尼诺年(厄尔尼诺滞后一年)和正常年,表明拉尼娜现象使得冷指日数增加。冷持续日数(CSDI)和月平均日较差(DTR)的值在厄尔尼诺年大于正常年和拉尼娜年,表明厄尔尼诺现象对这两个指数的影响较大。总体上,厄尔尼诺对极端暖指数和极值指数的变化影响较大,对极端冷指数的影响较小。厄尔尼诺对极端气温指数的影响发生在当年或次年,拉尼娜对极端气温指数的影响发生在拉尼娜滞后一年,厄尔尼诺对极端气温的影响大于拉尼娜对极端气温的影响。

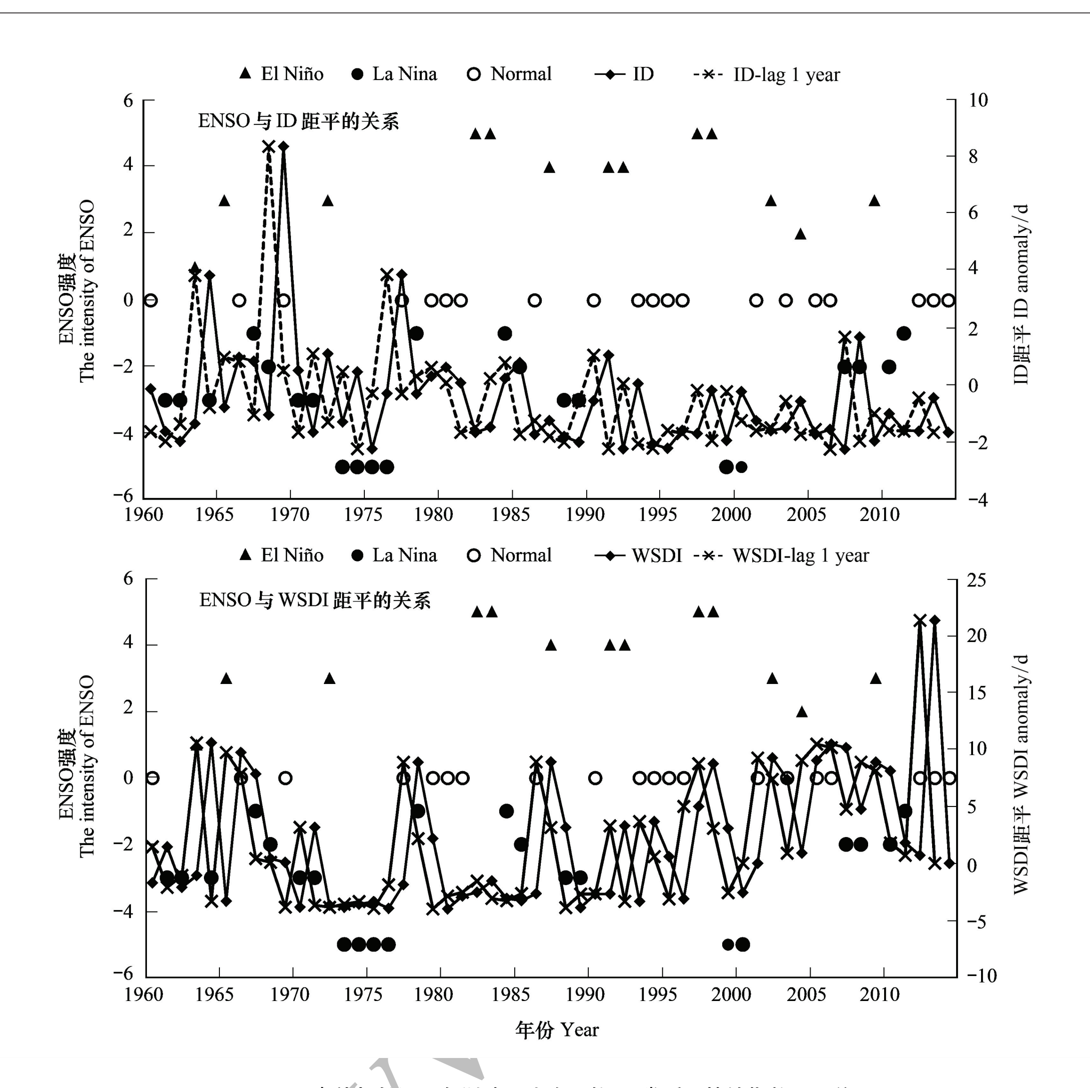


图5 ENSO事件与长江三角洲地区冰冻日数、异常暖昼持续指数距平关系图

Fig.5 The relationship between ENSO events and ice days, warm spell duration days anomaly

表9 长江三角洲地区ENSO事件发生前后极端气温指数统计

Table 9 Comparisons of average extreme temperature indices in ENSO years (and lag 1 years) **and normal years over Yangtze River Delta**

指数类型 Indices type	指数 Indices	暖事件年 Warm events years	暖事件年+1 Warm events one year lag	正常年 Normal years	冷事件年 Cold events years	冷事件年+1 Cold events one year lag
绝对指数 Absolute indices	ID(d)	1.28	1.63	2.06	1.66	2.08
	FD(d)	40.50	43.24	43.12	46.00	46.48
	SU(d)	142.52	136.07	141.67	135.77	138.96
	TR(d)	96.18	97.49	98.00	98.14	95.95
相对指数 Relative indices	TX10(d)	33.83	35.09	32.35	34.67	34.83
	TN10(d)	31.52	27.95	29.13	29.84	33.49
	TX90(d)	44.93	45.46	46.47	42.55	39.87
	TN90(d)	53.73	50.67	51.06	46.29	44.48
极值指数 Relative indices	TXn(℃)	0.19	0.11	−0.50	−0.02	−0.42
	TNn(℃)	−7.30	−7.45	−7.47	−7.23	−7.65
	TXx(℃)	36.91	37.38	37.35	37.01	36.78
	TNx(℃)	27.72	28.72	28.13	27.68	27.64
其它指数 Other indices	WSDI(d)	6.43	8.05	6.26	5.47	3.39
	CSDI(d)	1.92	1.56	1.26	1.31	1.48
	GSL(d)	324.22	319.76	321.23	319.36	319.72
	DTR(℃)	8.41	8.30	8.36	8.31	8.35

3　结论与讨论

3.1　结论

(1)近 55 年长江三角洲地区极端暖指日数(SU、TR、TX90、TN90、WSDI、GSL)和极值指数(TXn、TNn、TXx、TNx)呈显著上升趋势,冷指日数(ID、FD、TX10、TN10、CSDI)和月平均日较差(DTR)呈显著下降趋势。总体上,暖指数的上升趋势大于冷指数的下降趋势,全区范围所有指数的变化趋势均通过了 0.05 的显著性检验。

(2)空间分布上,3 个气候区极端气温指数变化趋势有所差异,多数极端气温指数在长江三角洲地区北部和南部变化较明显。92%以上的站点暖指日数 SU、TR、TX90、TN90、WSDI、GSL 呈增加趋势,85%的站点 TX90 呈增加趋势;所有站点冷指日数 ID、FD、TX10、TN10 呈减少趋势,87%的站点 CSDI 呈减少趋势;除 TXx 外,95%以上的站点其它极值指数为上升趋势。

(3)多数极端气温指数突变发生在 20 世纪 80 年代至 21 世纪初。冷指日数突变前后经历了由增加到减少的转变,多数暖指日数在突变点前后呈现由减少到增加的转变。周期分析表明,多数极端气温指数呈现 3—5 个周期震荡,主周期均在 10a 以上。

(4)多数极端气温指数与海拔、纬度、经度显著相关,不同指数与地理位置的相关系数大小有差异。极端气温指数变化与区域气候变暖密切相关,平均气温突变后,ID、FD、TX10、TN10 等冷指日数明显减少,SU、TR、TX90、TN90 等暖指日数明显增加,表明极端气温指数对气候变暖有较好的响应。

(5)厄尔尼诺对极端气温的影响发生在当年或次年,拉尼娜对极端气温的影响发生在拉尼娜滞后 1 年,总体上,厄尔尼诺对极端气温的影响大于拉尼娜的影响。

3.2　讨论

采用 16 个极端气温指数,分析了长江三角洲地区 1960—2014 年极端气温指数的年际变化趋势和空间分布差异,结果表明该区最低气温与最高气温相关的极端气温指数变化趋势与总体变暖一致,这与全球升温背景下很多区域的研究结论基本一致[20-25]。聂安祺[26]研究中国三大城市带城市化气候效应,得出长江三角洲地区的气候效应最强。本文得出的结论也印证了这一点,表明快速城市化背景下长江三角洲地区气温上升明显。有研究[27-29]发现,地面气温的上升是不对称的,即最低气温上升明显,而最高气温上升趋势较弱,气温日较差明显变小。本研究得出长江三角洲地区多数基于最低气温的极端气温指数变化幅度大于基于最高气温的极端气温指数变化幅度,气温日较差明显下降,进一步验证了地面气温上升中的“非对称性”现象。周雅清和张雷等人[20,29]的研究表明,国内外大量研究证实的“气温非对称性变化”现象,主要与城市化对地面最低气温的明显增加效应有关。由于台站变迁、观测仪器变更及城市化的影响,导致不同规模城市站地面气温记录序列中存在偏差。有研究[19-20,26,29]表明,城市热岛效应对区域平均气温有明显影响,今后计算区域极端气温时,需要对台站气温资料进行订正以获取消除了城市化效应的气温数据,这样才能更好地分析区域极端气温的变化趋势。

长江三角洲地处气候系统复杂的亚热带季风气候区,ENSO 通过影响东亚季风的强度和太平洋副热带高压的位置,进一步影响季风的强度和长江三角洲地区的气候。在强 El Niño 年,长江三角洲极端气温暖事件增加,意味着热浪的发生频率增加。在强 La Nina 年,极端气温冷事件增加,寒潮的发生频率增加。李崇银等[30]研究表明,ENSO 主要是由东亚季风异常造成的赤道西太平洋异常纬向风所驱动的热带太平洋次表层海温距平的循环。在厄尔尼诺年冬季,长江三角洲为异常偏南风,东亚冬季风偏弱,导致降水偏多气温冷湿;拉尼娜年冬季,长江三角洲为异常偏北风,冬季风偏强,导致降水偏少气温暖干。此外,长江三角洲地区的极端气温事件与 ENSO 的持续时间有关,ENSO 持续时间的长短又与大气环流的持续时间密切相关。ENSO 对长江三角洲地区气温影响机理复杂,未来要全面了解 ENSO 对极端气温的影响,有必要研究 ENSO 与低纬和中、高纬度环流的关系及其变化的物理过程。虽然 ENSO 不同位相长江三角洲地区极端气温差异明显,但显然 ENSO

不是影响区域极端气温变化的唯一原因,除了全球变暖与地理位置因素外,气候系统内部变率、城市温室气体和大气成分变化在内的外部强迫都与极端气温事件变化密切相关,这些要素对极端气温的影响有待于做进一步研究。

参考文献(References):

[1] 秦大河, Stocker T, 259 名作者和 TSU (驻伯尔尼和北京). IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.

[2] 郑祚芳. 北京极端气温变化特征及其对城市化的响应. 地理科学, 2011, 31(4): 459-463.

[3] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015:5-11.

[4] 崔林丽, 史军, 杨引明, 李贵才, 范文义. 长江三角洲气温变化特征及城市化影响. 地理研究, 2008, 27(4): 775-786.

[5] 吴荣军, 郑有飞, 刘建军, 谈建国, 许遐祯, 余永江. 长江三角洲主要城市高温灾害的趋势分析. 自然灾害学报, 2010, 19(5): 56-63.

[6] 闫俊, 江俊杰. 长江三角洲近 51 年极端气候事件变化及其原因分析. 广东气象, 2012, 34(5): 29-34.

[7] Timilsena J, Piechota T, Tootle G, Singh A. Associations of interdecadal/interannual climate variability and long-term Colorado River Basin streamflow. Journal of Hydrology, 2009, 365(3/4): 289-301.

[8] 孙建奇, 袁薇, 高玉中. 阿拉伯半岛-北太平洋型遥相关及其与亚洲夏季风的关系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(6): 750-762.

[9] 陈文, 兰晓青, 王林, 马音. ENSO 和北极涛动对东亚冬季气候异常的综合影响. 科学通报, 2013, 58(8): 634-641.

[10] 韩文韬, 卫捷, 沈新勇. 近 50 年中国冬季气温对 ENSO 响应的时空稳定性分析研究. 气候与环境研究, 2014, 19(1): 97-106.

[11] 伍红雨, 潘蔚娟, 王婷. 华南冬季气温异常与 ENSO 的关系. 气象, 2014, 40(10): 1230-1239.

[12] 徐同, 郭品文. 中国冬季气温对 ENSO 的非线性响应特征. 气象与减灾研究, 2007, 30(4): 9-13.

[13] 解明恩, 张万诚. ENSO 事件与云南冬季气温异常. 应用气象学报, 2000, 11(1): 115-122.

[14] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 孙颖. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究. 大气科学, 2014, 38(5): 974-992.

[15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999:37-40.

[16] Hamed K H. Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. Journal of Hydrology, 2008, 349(3/4): 350-363.

[17] 刘贤赵, 张安定, 李嘉竹. 地理学数学方法. 北京: 科学出版社, 2009:190-202.

[18] 李晓燕, 翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究. 气象学报, 2000, 58(1): 102-109.

[19] 谢志清, 杜银, 曾燕, 施雅风, 武金岗. 长江三角洲城市带扩展对区域温度变化的影响. 地理学报, 2007, 62(7): 717-727.

[20] 周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响. 高原气象, 2014, 33(6): 1589-1598.

[21] 王琼, 张明军, 王圣杰, 骆书飞, 汪宝龙, 朱小凡. 1962—2011 年长江流域极端气温事件分析. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625.

[22] 刘青娥, 吴孝情, 陈晓宏, 杨冰. 珠江流域 1960—2012 年极端气温的时空变化特征. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1356-1366.

[23] 赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 赵玉玲, 王冬利. 1965—2013 年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异. 地理研究, 2016, 35(4): 639-652.

[24] 闫慧敏, 陈伟娜, 杨方兴, 刘纪远, 胡云锋, 冀咏赞. 过去 50 年内蒙古极端气候事件时空格局特征. 地理研究, 2014, 33(1): 13-22.

[25] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 王圣杰, 马潜, 李小飞. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1720-1733.

[26] 聂安琪, 陈星, 冯志刚. 中国三大城市带城市化效应的检测与对比. 气象科学, 2011, 31(4): 372-383.

[27] Qian W H, Lin X. Regional trends in recent temperature and indices in China. Climate Research, 2004, 27(2): 119-134.

[28] 华丽娟, 马柱国, 罗德海. 1961—2000 年中国区域气温较差分析. 地理学报, 2004, 59(5): 680-688.

[29] 张雷, 任国玉, 刘江, 周雅清, 任玉玉, 张爱英, 冯亚文. 城市化对北京气象站极端气温指数趋势变化的影响. 地球物理学报, 2011, 54(5): 1150-1159.

[30] 李崇银, 穆穆, 周广庆, 杨辉. ENSO 机理及其预测研究. 大气科学, 2008, 32(4): 761-781.